

6-28-2024

Classification Cooperative Scheduling of U-automated Container Terminal Based on Container Markers

Fei Wang

*Institute of Logistics Science & Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China,
1596816275@qq.com*

Daofang Chang

*School of Logistics Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China,
dfchang@shmtu.edu.cn*

Furong Wen

Beibuwan Port Co., Ltd., Nanning 530000, China

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Classification Cooperative Scheduling of U-automated Container Terminal Based on Container Markers

Abstract

Abstract: To improve the confusing scheduling of U-shaped yard operations due to improper classification of containers, the classification cooperative scheduling process is proposed, in which the classification cooperative scheduling model is established with the constraints of coordinated operation and efficient independent operation. The container classification principle and the container multiple stacking principle are proposed, the stacking point is selected by the weighted calculation based on the container operation mark to design the penalty mechanism, and the classification cooperative heuristic algorithm solution model is designed. Comparative experiments show that the strategy used in the algorithm is superior, which can reduce the equipment waiting time for each other in the operation. As the size of the experiment increases, the proportion of waiting time decreases and the overall operational efficiency of the U-shaped yard increases.

Keywords

U-shaped yard, classified cooperative scheduling, container markers, penalty mechanism, operational efficiency

Recommended Citation

Wang Fei, Chang Daofang, Wen Furong. Classification Cooperative Scheduling of U-automated Container Terminal Based on Container Markers[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(6): 1392-1403.

基于集装箱作业标记的U型堆场分类协同调度

王飞¹, 苕道方^{2*}, 温富荣³

(1. 上海海事大学 物流科学与工程研究院, 上海 201306; 2. 上海海事大学 物流工程学院, 上海 201306;
3. 北部湾港股份有限公司, 广西 南宁 530000)

摘要: 为优化U型堆场作业因集装箱分类不合理造成调度混乱的问题, 提出分类协同调度过程, 以不同任务协同作业、各任务高效作业的过程为约束条件建立分类协同调度模型。提出集装箱分类原则和集装箱多重堆存原则, 在堆存选位时基于集装箱作业标记进行加权计算构成惩罚机制, 设计了分类协同启发式算法求解模型。实验表明: 基于惩罚机制的分类协同启发式算法所采用的策略更优, 减少作业过程中设备相互等待的时长, 并且随着实验规模的增加等待时长占比低, 进而提高U型码头整体作业效率。

关键词: U型堆场; 分类协同调度; 集装箱作业标记; 惩罚机制; 作业效率

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)06-1392-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0333

引用格式: 王飞, 苕道方, 温富荣. 基于集装箱作业标记的U型堆场分类协同调度[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(6): 1392-1403.

Reference format: Wang Fei, Chang Daofang, Wen Furong. Classification Cooperative Scheduling of U-automated Container Terminal Based on Container Markers[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(6): 1392-1403.

Classification Cooperative Scheduling of U-automated Container Terminal Based on Container Markers

Wang Fei¹, Chang Daofang^{2*}, Wen Furong³

(1. Institute of Logistics Science & Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2. School of Logistics Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 3. Beibuwan Port Co., Ltd., Nanning 530000, China)

Abstract: To improve the confusing scheduling of U-shaped yard operations due to improper classification of containers, the classification cooperative scheduling process is proposed, in which the classification cooperative scheduling model is established with the constraints of coordinated operation and efficient independent operation. The container classification principle and the container multiple stacking principle are proposed, the stacking point is selected by the weighted calculation based on the container operation mark to design the penalty mechanism, and the classification cooperative heuristic algorithm solution model is designed. Comparative experiments show that the strategy used in the algorithm is superior, which can reduce the equipment waiting time for each other in the operation. As the size of the experiment increases, the proportion of waiting time decreases and the overall operational efficiency of the U-shaped yard increases.

Keywords: U-shaped yard; classified cooperative scheduling; container markers; penalty mechanism; operational efficiency

收稿日期: 2023-03-23 修回日期: 2023-05-22

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1704403)

第一作者: 王飞(1999-), 男, 硕士生, 研究方向为自动化集装箱码头数字孪生。E-mail: 1596816275@qq.com

通讯作者: 苕道方(1978-), 男, 教授, 博士, 研究方向为港航物流仿真与监控、虚拟现实与模拟系统开发等。

E-mail: dfchang@shmtu.edu.cn

0 引言

自动化集装箱码头集成了现代化信息通信技术、控制等^[1]技术实现了高效调度管理。自动化集装箱码头调度过程中仍存在调度效率不高、调度设备不协调、联运调度不合理等问题。针对传统自动化集装箱码头调度研究, 研究学者通常将调度完成时间作为目标, 通过提升单一设备调度或多设备协同调度的效率, 减少不必要的时间浪费, 达到优化码头整体调度的效果。

Li等^[2]从单一设备调度的角度研究了固定装卸速率的岸桥调度问题, 设计了一种以最小化完成时间为目标的优化算法, 并通过小规模实例实现了求解验证; Xing等^[3]针对AGV的静态调度问题提出了混合整数规划模型, 并利用启发式算法进行求解; Luo等^[4]针对多设备协同调度的问题提出了一种策略, 对车辆调度和集装箱选位进行了协同调度, 并利用遗传算法进行大规模问题的求解; 梁承姬等^[5]研究了多设备调度问题, 将问题背景聚焦于设置有前沿堆场缓冲区的码头堆场, 提出AGV与场桥之间的协同调度, 提高了作业效率; Liu等^[6]基于码头海侧作业背景, 针对船舶到港时间不确定性因素研究了联合泊位分配和码头起重机分配问题, 提出了基于鲁棒优化思想的多船舶优先级模型, 并设计了结合水平滚动算法的智能优化算法解决问题; Lu等^[7]基于传统水平式布局堆场考虑了堆场轨道吊、AGV和外集卡的运行速度和设备硬件问题所构成的不确定性因素, 提出了一种综合调度优化模型, 并采用粒子群算法求出最优解; Xu等^[8]定位码头作业流程的末端环节外集卡提箱调度, 考虑到外集卡到达时间的不确定性问题, 提出了以调度成本最小化为目标的基于混合整数非线性规划的外集卡动态预约调度模型。

传统自动化集装箱码头仍存在许多问题, 一方面, 由于传统自动化集装箱码头布局的局限性, 水平运输工具只能到达堆场的端部区域,

堆场装卸作业点较少, 装卸作业目标位置调整不灵活, 不仅造成堆场设备相互等待产生作业时长被迫延长的问题, 而且容量有限的端部交换区还会因为堆场作业延迟而出现运输设备排队拥堵的现象, 影响码头调度计划。另一方面, 传统自动化集装箱码头堆场内集装箱作业完全依靠轨道吊, 轨道吊平行作业距离长, 往返频繁, 设备负载压力大, 设备容易损坏; 此外, 共轨运行的两台轨道吊还会因为集装箱任务的变动造成路径上的相互影响, 降低了堆场装卸效率。因此, 研究新型自动化集装箱码头布局下堆场调度问题, 进一步提高集装箱码头作业效率已经成为了研究热点。

近年来, 一种U型堆场布局方案被提出, 堆场采用垂直式布局方式, AGV与外集卡可进入箱区工作, 且二者的通道相互隔离。在U型布局下AGV和外集卡可通过各自的环形通道进入或离开箱区, 轨道吊在作业时减少水平移动距离。丁一等^[9]对U型自动化集装箱码头建立仿真模型模拟作业过程, 并将仿真结果与传统自动化集装箱码头进行对比, 结果表明U型布局提升了码头整体作业效益。Xu等^[10]以U型自动化集装箱码头为研究背景, 从码头整体调度入手, 研究多运输设备和多装卸设备协同调度问题, 构建了新型多设备集成调度模型, 并通过基于强化学习的超启发式遗传算法得到最优化结果; Xu等^[11]基于U型布局研究了码头作业无冲突综合调度, 建立了卸货过程中码头起重机、AGV和双悬臂导轨起重机无冲突综合调度的混合规划模型, 并设计遗传海鹰优化算法进行问题求解; Liu等^[12]基于U型布局研究了海铁联运码头多设备调度, 建立了两级规划模型, 并基于时空贪婪策略设计了双层遗传算法解决问题, 提高了调度效率; Li等^[13]基于U型布局, 根据AGV、外集卡可进入箱区作业且通道相互隔离的特点, 提出了以最小完成时间为目标的混合调度模型, 并利用改进的混沌粒子群算法进行问题求解; 郭雷^[14]基于U型码头针对IGV调度优化

问题构建整数规划模型，并进行求解，提高了IGV调度效率；李曼^[15]基于U型自动化集装箱码头，研究了堆场堆存策略及箱位分配问题，在分析U型布局的特点及轨道吊交互模式之后，提出了“箱区组”“贝位组”概念，优化了分配策略，采用改进遗传布谷鸟算法结合多级启发式算法对问题进行求解，最终证明了新的策略在U型布局下的合理性。

目前，对于码头调度问题还存在许多不完善的地方，一方面，当今针对U型布局的研究成果较少，且研究方法和调度场景单一，未能结合当下多样的集装箱分类存储、联运的实际情况进行研究；另一方面，对于提升自动化集装箱码头调度中堆场装卸效率的研究不够，未考虑调度过程中设备因各因素造成相互等待停滞的现象。本文基于U型自动化集装箱码头布局针对海、陆运输集装箱多样的分类存储、联运的调度问题，提出堆场多设备分类协同调度方案，提高装卸效率，为U型布局下的调度研究提供思路。

1 分类协同调度模型

1.1 问题描述

集装箱标记是指为便于对集装箱在流通和使用中识别与管理，根据不同信息而编制的集装箱代号、标志的统称。自动化集装箱码头堆场存储集装箱通常根据集装箱装载货物的种类、任务等标记进行同类型集中存储。不同标记的集装箱存放在一起，容易造成调度计划混乱，使设备间协同作业被迫出现相互等待的现象，降低码头作业效率。例如，场桥集装箱作业过程中的翻箱操作次数增加，水平运输设备被迫等待，影响码头作业效率。因集装箱标记类别较多，本文选取其中较典型的2种标记，分别是联运任务标记和自重标记。联运任务标记体现集装箱任务情况，区分运输方式、转运目的地远近；自重标记体现集装箱质量，区分轻重。

为优化U型布局下多样化的集装箱分类协同调度问题，设计了分类协同调度模型。分类协同调度过程划分为若干子过程交替在海侧、陆侧半区执行完整的装卸任务，每一个子过程只在一侧作业以减少平行双臂轨道吊移动距离。根据集装箱联运任务标记，将集装箱分类，并由负责分类区作业的双臂轨道吊执行分类入场操作；利用U型堆场外道路深入、作业点灵活调整的特点，水平运输设备深入作业点等待集装箱装卸；利用U型堆场双臂轨道吊作业相互协调的特性，2台双臂轨道吊相互配合，根据不同标记和不同转运任务，实现装、卸工作同步进行。调度方案减少了作业过程中设备间、设备与水平运输设备相互等待的时间，提高了作业效率。分类作业堆场布局如图1所示。

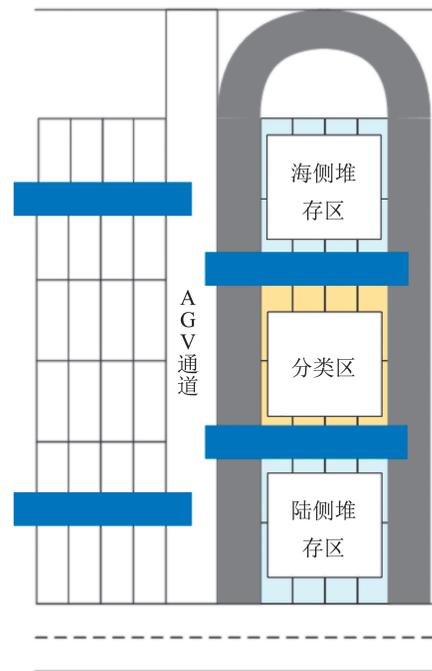


图1 分类作业堆场布局

Fig. 1 Layout of storage yard under classification working

1.2 问题假设

本文主要研究U型集装箱码头堆场设备协同调度问题。为了便于问题的研究与求解，做出如下假设：

- (1) 所有集装箱均为20英尺标准箱, 且数量已知;
- (2) 堆场作业AGV数量充足;
- (3) 不考虑码头前沿作业的岸桥作业情况, 假设岸桥作业时间和船舶集装箱卸货顺序不计;
- (4) 岸桥与AGV之间集装箱交接、AGV与双臂轨道吊之间集装箱交接、双臂轨道吊与外集卡之间集装箱交接的交接时间不计, 即假设交接工作瞬时完成;
- (5) AGV移动速度恒定且已知, 假设AGV搬运作业时长恒定且已知;
- (6) 堆场现有堆存集装箱数量和位置已知;
- (7) 集装箱联运任务标记已知;
- (8) 假设一个作业过程内容包括集装箱分类任务、转运任务、堆存任务。

1.3 符号说明

- (1) 集合
- $I=\{1, 2, \dots, i_{\max}\}$ 为作业子过程集合, i_{\max} 为作业子过程总数;
- $M=\{1, 2, \dots, m_{\max}\}$ 为集装箱集合, m_{\max} 为集装箱总数;
- $\chi=\{1, 2\}$ 为当前作业状态, 为1表示当前作业状态为堆存作业, 否则为分类作业或转运作业;
- $C=\{1, 2, \dots, c_{\max}\}$ 为贝位集合, c_{\max} 为贝位总数;
- $R=\{1, 2, \dots, r_{\max}\}$ 为堆栈集合, r_{\max} 为贝位内堆栈总数;
- $H=\{1, 2, \dots, h_{\max}\}$ 为堆叠层数集合, h_{\max} 为贝位堆叠的最大层数;
- $E=\{1, 2\}$ 为同一对堆场轨道吊集合, 当值为1时代表海侧轨道吊, 当值为2时代表陆侧轨道吊;
- (2) 参数变量
- t : 当前子过程时刻;
- i : 当前子过程序号;

- v : AGV执行集装箱搬运工作时的运动速度;
- t_{AGV} : AGV执行集装箱搬运工作时长;
- M_i : 上一作业子过程结束时剩余集装箱总数;
- t_i : 子过程 i 的时长;
- t_i^j : 第 i 个子过程的各种作业的时长;
- t_m : 单个集装箱搬运作业的时长;
- W_m : 集装箱 m 的自重标记;
- S_m : 集装箱 m 的联运任务标记;
- N_c : 贝位 c 的最大堆存容量;
- $\text{loc}(c, r, h)$: c 贝位 r 堆栈 h 层的箱位;
- s : 堆存时当前待选箱位由惩罚机制计算的分数值;
- A : 一个足够大的整数;
- τ : 轨道吊移动一个贝位距离的时间;
- $X_{c,r,h}^m$: 当集装箱 m 堆存在 $\text{loc}(c, r, h)$ 时取1, 否则取0;

$Y_{c,r,h}^w$: 仅不满足“重压轻”要求产生翻箱, 当相邻2个上下层间下层集装箱自重标记大于上层集装箱自重标记时, 变量取1, 否则取0;

$Y_{c,r,h}^s$: 仅不满足“近压远”产生翻箱, 当相邻2个上下层间下层集装箱联运任务标记小于上层集装箱联运任务标记时, 变量取1, 否则取0。

(3) 决策变量

$Y_{crane}^{E,t} = \begin{cases} 1, & \text{轨道吊} E \text{在} t \text{时刻执行堆存任务} \\ 0, & \text{轨道吊} E \text{在} t \text{时刻执行分类或转运任务} \end{cases}$

$P_E^{t,m} = \begin{cases} 1, & \text{轨道吊} E \text{在} t \text{时刻执行第} m \text{个箱分类任务} \\ 0, & \text{轨道吊} E \text{在} t \text{时刻未执行分类任务} \end{cases}$

$F_E^{t,m} = \begin{cases} 1, & \text{轨道吊} E \text{在} t \text{时刻执行第} m \text{个箱堆存任务} \\ 0, & \text{轨道吊} E \text{在} t \text{时刻未执行堆存任务} \end{cases}$

$U_E^{t,m} = \begin{cases} 1, & \text{轨道吊} E \text{在} t \text{时刻执行第} m \text{个箱转运任务} \\ 0, & \text{轨道吊} E \text{在} t \text{时刻未执行转运任务} \end{cases}$

1.4 模型建立

目标函数:

作业过程中因不合理的协同调度造成时间浪费的总时长为

$$\min f = \left| \sum_{i=1}^{i_{\max}} t_i^2 - t_i^1 \right| \quad (1)$$

约束条件:

所有子过程时长总和为

$$t = \sum_{i=1}^{i_{\max}} t_i, t_i \geq 0 \quad (2)$$

约束子过程中的各任务时长为

$$t_i \geq t_i^2 \quad (3)$$

$$t_i \geq t_i^1 + m_i t_m \quad (4)$$

约束集装箱分配总数为

$$\sum_{i=1}^{i_{\max}} m_i = m_{\max} \quad (5)$$

单个作业组集装箱搬运的个数为

$$m_i = \left\lceil (t_i^2 - t_i^1) / t_{AGV} \right\rceil \quad (6)$$

上一子过程完成后剩余船舶进口集装箱的总数为

$$M_{i+1} = M_i - m_i, (M_1 = M) \quad (7)$$

过程总数的约束为

$$N_i = \{i \mid M_i - m_i = 0\} \quad (8)$$

单个子过程作业时长为

$$t_i = t_i^2 \cup (t_i^1 + m_i \cdot t_m) \quad (9)$$

每个集装箱只能堆存在1个箱位,且一个箱位至多只能堆存一个集装箱:

$$\sum_{c=1}^{N_c} \sum_{r=1}^{N_r} \sum_{h=1}^{N_h} X_{c,r,h}^i = 1, \forall i \in I \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{i_{\max}} X_{c,r,h}^i \leq 1, \forall c \in C, \forall r \in R, \forall h \in H \quad (11)$$

入堆存放的集装箱下方不允许有空箱位:

$$\sum_{i=1}^{i_{\max}} X_{c,r,h-1}^i \geq \sum_{i=1}^{i_{\max}} X_{c,r,h}^i, \quad (12)$$

$$\forall c \in C, \forall r \in R, \forall h \in H, h \geq 2$$

集装箱入场满足先到的先存原则:

$$\sum_{i=1}^{i_{\max}} i X_{c,r,h}^i + \left(1 - \sum_{i=1}^{i_{\max}} X_{c,r,h}^i \right) A - \sum_{i=1}^{i_{\max}} i X_{c,r,h-1}^i \geq 0, \quad (13)$$

$$\forall c \in C, \forall r \in R, h \geq 2$$

同一时刻海侧和陆侧轨道吊不能执行同一作业:

$$Y_{\text{crane}}^{1,t} + Y_{\text{crane}}^{2,t} = 1 \quad (14)$$

避免堆场作业时堆存任务、分类任务的轨道吊相互影响:

$$F_{E_1}^{t,i_1} - P_{E_2}^{t,i} - \sum_{c=1}^{N_c} \sum_{r=1}^{N_r} \sum_{h=1}^{N_h} X_{c,r,h}^{i,t} + \sum_{c=1}^{N_c} \sum_{r=1}^{N_r} \sum_{h=1}^{N_h} X_{c,r,h}^{i_1,t} \geq 0 \quad (15)$$

$$\forall i, i_1 \in I \text{ 且 } i_1 < i, E_1, E_2 \in \{1, 2\} \text{ 且 } E_1 \neq E_2$$

避免堆场作业时分类任务、转运任务的轨道吊相互影响:

$$2U_E^{t,i_1} - P_E^{t,i} - \sum_{c=1}^{N_c} \sum_{r=1}^{N_r} \sum_{h=1}^{N_h} X_{c,r,h}^{i,t} + \sum_{c=1}^{N_c} \sum_{r=1}^{N_r} \sum_{h=1}^{N_h} X_{c,r,h}^{i_1,t} \leq 0 \quad (16)$$

$$\forall i, i_1 \in I \text{ 且 } i_1 < i; E \in \{1, 2\}$$

2 算法设计

本文提出的启发式算法参考了堆场翻箱时的应用可采用最小翻箱数原则、最矮堆栈原则的方法^[16]和集装箱“候选队列”堆存的概念^[17],针对本文所研究的基于集装箱作业标记的U型堆场分类协同调度问题,提出集装箱分类规则,并基于多重集装箱堆存原则提出惩罚机制执行集装箱分类堆存。基于集装箱分类规则、多重集装箱堆存原则设计分类协同启发式算法。

在算法设计过程中每个集装箱的作业标记包括联运任务标记和自重标记,均根据箱体标记进行数值简化处理。当联运任务标记数值为奇数时表示集装箱转运任务需要海上联运,当联运任务标记数值为偶数时表示集装箱转运任务需要陆上转运。联运任务标记数值小表示目的地近,数值大表示目的地远;自重标记表示集装箱的质量等级,数值越大集装箱越重。

2.1 多重集装箱堆存原则

多重集装箱堆存原则包括集装箱近压远、重压轻原则和就近最矮堆栈原则。

集装箱近压远、重压轻原则要求待堆存集装箱根据联运任务标记和自重标记进行堆垛。为了减少不必要的时间,将集装箱近压远视为惩罚机制中优先级最高的原则以保证提箱转运时减少不必要的翻箱操作,影响总体作业效率,所以,必

须满足将联运任务目的地近的集装箱堆垛在堆栈上层; 在满足近压远之后考虑堆场堆垛安全性, 根据重压轻优先将质量更大的集装箱堆放在堆栈上层以保持堆栈的稳定性。

就近最矮堆栈原则要求集装箱优先挑选层数较低的堆栈进行堆存, 目的是降低堆场各贝位的集装箱堆垛重心、增强稳定性以预防台风等恶劣天气。同时, 要求集装箱堆优先选择靠近分类区的堆栈进行堆存, 目的是减少双臂轨道吊往返次数以提高作业效率、减少设备损耗。

2.2 集装箱分类规则

集装箱在入堆前遵循分类规则完成分类任务。集装箱分类规则以集装箱的联运任务标记为分类依据。集装箱首先由双臂轨道吊提起进入分类区内, 待海上联运的集装箱存放在分类区靠海侧的区域内, 待陆上联运的集装箱存放在分类区靠陆侧的区域内。有转运任务的集装箱存放在分类区的临时区内等待转运, 若无转运任务则等待双臂轨道吊提起堆放到指定箱位。

2.3 惩罚机制

本文基于集装箱分类规则和多重集装箱堆存原则提出惩罚机制并设计箱位选择算法实现高效集装箱堆存。惩罚机制基于分类规则在分类任务完成之后为集装箱在同类堆存区筛选可供堆存的最优箱位; 惩罚机制结合多重集装箱堆存原则所提近压远、重压轻、就近最矮堆栈等方面进行权重计算, 对不满足原则要求的箱位分数进行加分惩罚。近压远的惩罚权重最大, 其次是重压轻, 就近最矮堆栈的惩罚权重最低。

该机制通过基于惩罚机制箱位选择算法实现结果输出。基于惩罚机制箱位选择算法记录了可供当前集装箱堆存的所有箱位的分数, 并比较每一个箱位最终分数, 将最终分数最低的箱位作为目标箱位并实现堆存操作。基于惩罚机制箱位选择算法流程图如图2所示。

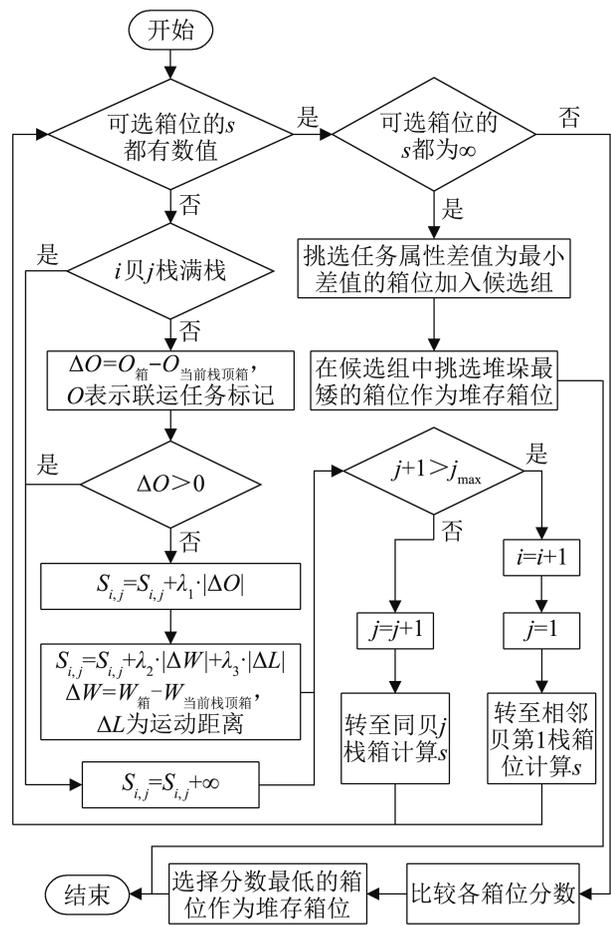


图2 基于惩罚机制箱位选择算法流程图

Fig. 2 Flow chart of slot selection algorithm based on penalty mechanism

2.4 分类协同启发式算法设计

分类协同启发式算法以模块化工作方式将全过程分成若干个子过程, 每个子过程中两台轨道吊相互配合在同一时间负责不同的任务, 子过程更迭时两台轨道吊相互交换任务。轨道吊操作任务包括分类任务、堆存任务和转运任务。

分类协同启发式算法涵盖了操作任务的计算。分类任务基于集装箱分类规则实现集装箱分类入场; 堆存任务基于惩罚机制箱位选择算法实现集装箱的选位、入堆; 转运任务根据转运需求执行集装箱转运协调堆场作业。

分类协同启发式算法步骤:

(1) 分类任务。算法根据“集装箱分类规则”

的过程判断集装箱联运任务标记，以分配其在分类区的位置。

(2) 转运任务循环执行。进入分类区后，若无转运任务则需要暂存至堆存区；若有转运任务进入临时区等待水平运输设备转运。

(3) 堆存任务。从堆存区内靠近当前集装箱位置的贝位进行判断，根据惩罚机制若该贝位的可选栈已经满栈则将该栈的分数记为无限大。

(4) 判断当前列栈顶集装箱标记情况。首先，对比栈顶集装箱和待堆存集装箱的联运任务标记数值大小，若栈顶集装箱的联运任务标记数值更小，则将该列的分数记为无限大，并转移至同贝位相邻栈执行步骤(3)操作。若在转移过程中当前贝位所有的列栈顶集装箱的联运任务标记都小于待堆存集装箱标记，则转移至相邻贝位的列执行步骤(3)操作。当所有贝位的所有列栈顶集装箱的联运任务标记都小于待堆存集装箱的标记，则分别计算所有栈的顶栈集装箱联运任务标记数值与待堆存集装箱的标记数值的差值 ΔS ，记录最小差值 $\min \Delta S$ ，将所有差值为 $\min \Delta S$ 的栈加入候选列表，并在候选列表中比较各列的堆栈数，选择堆栈数最小的栈执行步骤(7)。

若栈顶集装箱的联运任务标记数值更大，则进入计算环节。对比栈顶集装箱和待堆存集装箱的自重标记数值大小，当待堆存集装箱的自重标记更大时，根据式(17)进行计算；当栈顶集装箱自重标记更大时，根据式(18)进行计算。

$$s = \lambda_1 \cdot \Delta S + \lambda_2 \cdot \Delta W + \lambda_3 \cdot \Delta(c+r) \quad (17)$$

$$s = \lambda_1 \cdot \Delta S + \lambda_2 \cdot \Delta W + \lambda_3 \cdot \Delta(c+r) + 1 \quad (18)$$

式中： λ_1 为联运任务标记数值差值的权重； λ_2 为自重标记差值的权重； λ_3 为双臂轨道吊移动距离的权重。

(5) 当前栈分数计算完毕之后，自动转移至同贝位相邻栈重复步骤(3)(4)计算分数。

若在转移过程中当前贝位所有的列均已满栈，则转移至相邻贝位的栈，并重复步骤(3)(4)计算该列的分数。

(6) 比较各列的分数大小，选择分数最低的箱位作为集装箱堆存点。当出现分数一样的栈时，远离分类区的栈分数自动加1。

(7) 将集装箱存入堆存点。

分类协同调度启发式算法流程图如图3所示。

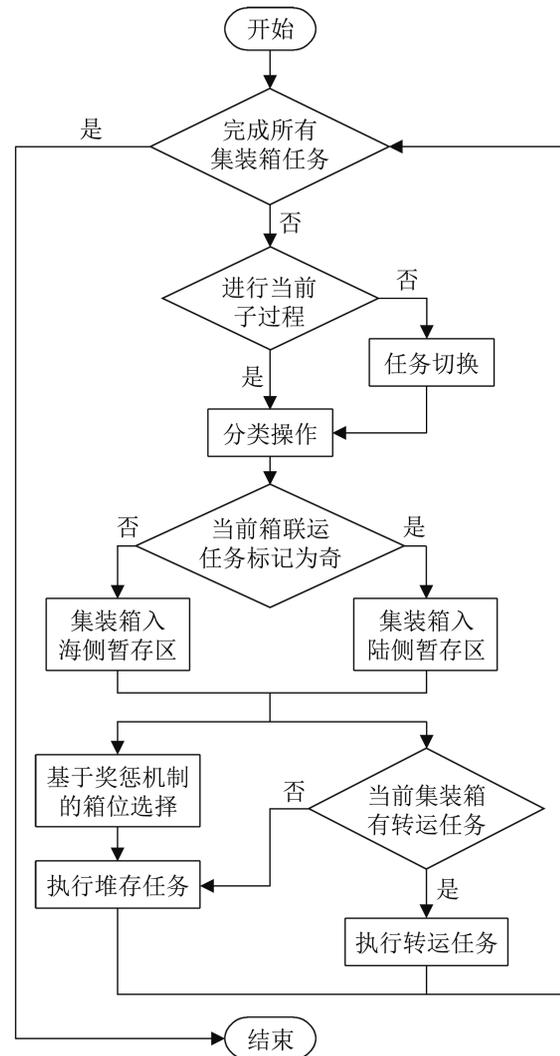


图3 分类协同调度启发式算法流程图

Fig. 3 Flowchart of classification collaborative scheduling heuristic algorithm

3 数值实验与分析

通过案例对上述基于惩罚机制启发式算法的有效性进行测试。在每贝由5栈4层构成的共计6个贝位下进行基于集装箱作业标记的分类协同调度实验。

集装箱的到达顺序与箱号保持一致, 且集装箱的联运任务标记和自重标记通过指定参数范围随机生成, 以8个集装箱规模的作业标记参数为例, 参数如表1所示。

表1 集装箱作业标记参数
Table 1 Container parameter

集装箱序号	联运任务标记	自重标记	转运任务
①	1	3	有
②	2	4	无
③	3	1	无
④	4	3	有
⑤	4	2	有
⑥	3	2	无
⑦	2	1	无
⑧	1	1	无

所有实验都是在配置为AMD Ryzen7 5800H@3.20GHz处理器、16 G内存的Windows10系统的笔记本, 采用的启发式算法均通过MATLAB进行编写。

初始化堆场中的集装箱以及各自对应的作业标记参数, 以还原实际情景。分次进行实验, 在参数范围内随机生成集装箱及各自对应的作业标记参数作为输入, 第一组参数的集装箱数量为8个, 随后每一组的集装箱数量比前一组增加4个, 最后一组的集装箱数量为80个, 最终随机形成19组参数。

以8个集装箱输入为例, 分类操作步骤如图4所示。图中共2贝5栈的区域代表堆场分类区, 其中, 3贝表示分类区内待海上联运的集装箱区域; 4贝表示分类区内待陆上联运的集装箱区域; 每贝中灰色方块表示有转运任务的集装箱暂放的临时区; 每贝每栈的数字表示当前栈已堆箱数。

如表1所示, 1号集装箱有转运任务, 在图4中以灰色标注表示含有转运任务的集装箱。根据1号集装箱的联运任务标记数值奇偶性判断转运方式, 因1号集装箱的联运任务标记 S_1 为奇数1, 则判断该集装箱需要海上联运, 选择3贝中的箱位进行存储, 同时, 1号集装箱含有转运任务, 所以

选择3贝中的转运临时区进行暂存, 等待转运; 2号集装箱没有转运任务, 且2号集装箱的联运任务标记 S_2 为偶数2, 则进入4贝从左至右选择堆垛数最少的一个栈箱位loc(4,1,2)进行暂存, 等待进一步堆存, 所以2号集装箱暂存在4贝的1栈箱位中。后续的集装箱分类操作以此类推。

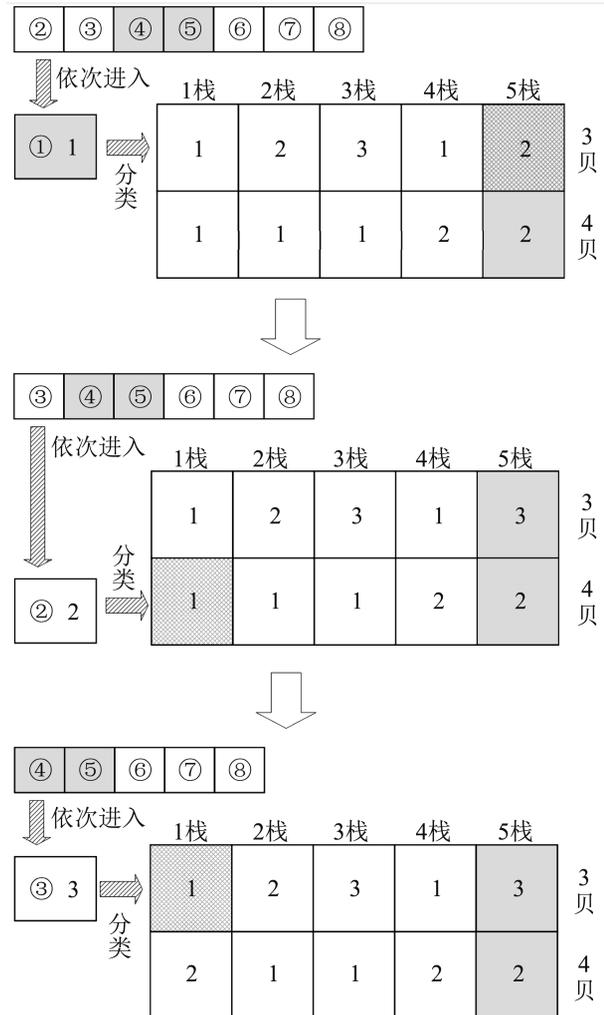


图4 分类操作步骤图

Fig. 4 Classification operation procedure diagram

在集装箱分类的同时, 集装箱堆存操作、转运操作也同时进行。转运操作由水平运输设备直接进入堆场作业点位, 进行集装箱转运。

在集装箱执行分类操作、转运操作的同时, 双臂轨道吊对分类区内的集装箱进行堆存操作。如图5堆存过程图所示, “集1[1,3]”文字样式表

示“当前集装箱编号 $[W,S]$ ”；图中每个箱位的信息代表该箱位所在栈的顶栈箱位的集装箱编号、集装箱作业标记和分数。

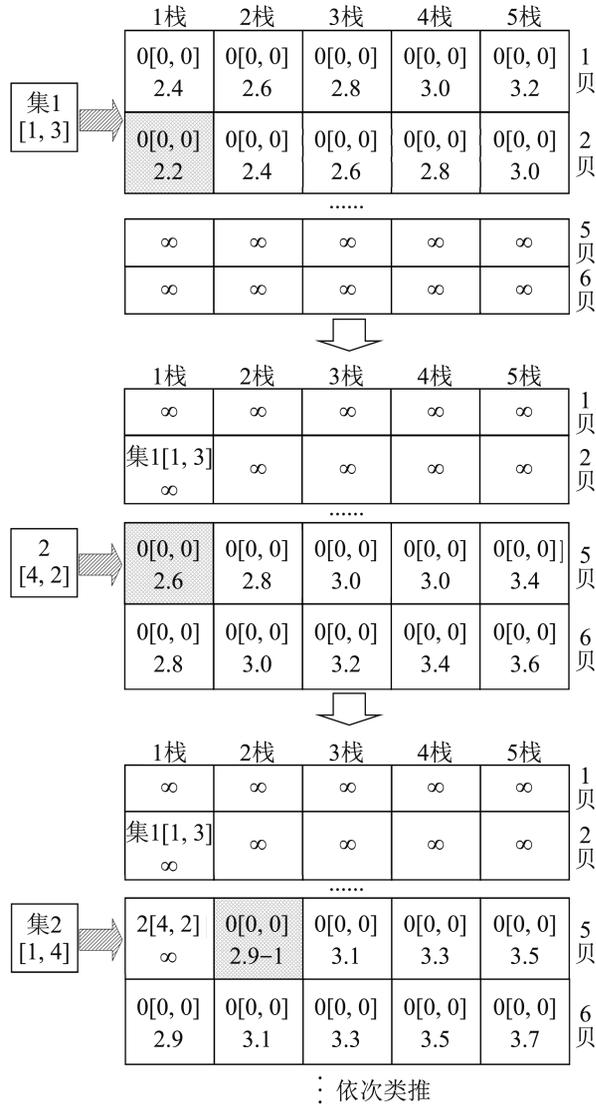


图 5 堆存过程图
Fig. 5 Stack process diagram

首先，选中 $W_{集1}=1, S_{集1}=3$ 的集装箱 1，从分类区最近的贝位首栈箱位开始计算，根据式(17)计算 2 贝 1 栈的箱位分数，得到 $s_{(2,1)}=2.2$ ；进入 2 贝 2 栈的箱位，得到 $s_{(2,2)}=2.4$ ；依次类推，得到最低分的箱位为 $loc(2, 1, 1)$ 并堆存。随后选中 $W_2=4, S_2=2$ 的 2 号集装箱，根据式(17)计算每箱位分数，得到最低分的箱位为 $loc(5, 1, 1)$ 并堆存。堆存操作

依次类推，得到最终调度结果如图 6 所示。

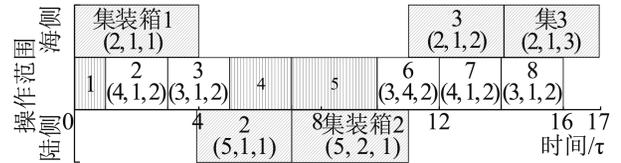


图 6 调度结果图
Fig. 6 Scheduling result graph

对比实验首先比较不同策略对调度效率的影响。转运过程中不能避免产生翻箱操作，过多的翻箱时间会增加不必要的设备等待时间。合理的策略能够使堆场堆存更加有序，从而减少转运过程中不必要的翻箱时间。

本文策略对比实验将 19 组参数作为输入，以转运任务过程中影响调度效率的翻箱时间占比作为输出值，基于分类协同启发式算法的计算框架，利用控制变量法，逐一改变算法策略计算结果并输出比较。策略效果对比图如图 7 所示，其中，图例所示“双原则策略”代表结合就近最矮堆栈原则和近压远、重压轻原则的策略；“全原则策略”代表本文算法采用的策略，在双原则策略的基础上增加集装箱分类规则的策略。

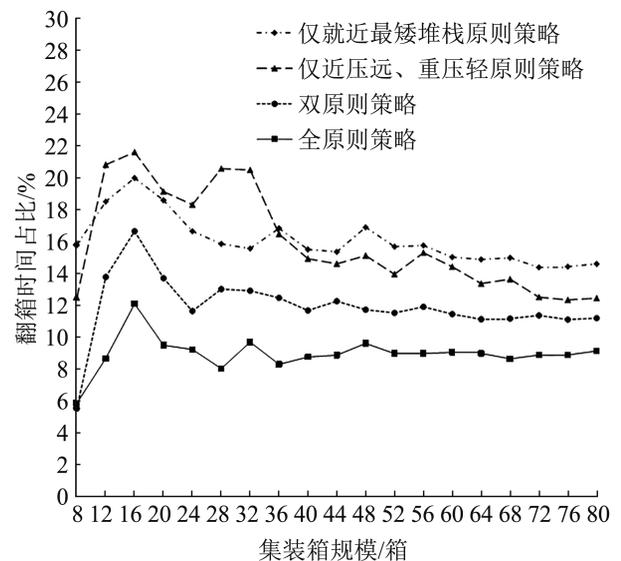


图 7 策略效果对比图
Fig. 7 Strategy effectiveness comparison chart

如图7所示, 当集装箱规模在40箱以内时, 4条数据曲线均存在数值波动; 当集装箱规模大于40箱时, 除仅近压远、重压轻原则策略的数据曲线保持向下趋势外, 其余3条数据曲线均出现收敛并趋于稳定, 由此可得仅就近最矮堆栈原则、双原则和全原则策略下的翻箱时间占比数值变化更加稳定。

在整个过程中, 首先比较仅就近最矮堆栈原则策略和仅近压远、重压轻原则策略的计算结果。前者数据峰值为20%, 最大数值差为5.58%, 收敛后数值稳定在14.5%~15%之间; 后者数据峰值为21.62%, 最大数值差为9.24%。二者数据接近, 一方面, 当规模在36箱以下时前者数值较低, 因为大量空余箱位情况下存放少量集装箱时, 集装箱可分散堆放, 未出现大量集装箱无序堆叠, 所以翻箱次数少; 而当规模大于36箱时, 随着集装箱规模增加, 由于前者的局限性和无序性, 集装箱无序堆叠的情况增多, 同时由于后者的有序性堆叠, 前者的翻箱时间占比逐渐大于后者。另一方面, 前者数据最大数值差更小且数据曲线趋势较平缓, 所以前者翻箱时间占比数值变化更加稳定。

双原则的数据峰值为16.66%, 最大数值差为11.11%, 收敛后数值稳定在11%~11.5%之间; 全原则的数据峰值为12.12%, 最大数值差为6.24%, 收敛后数值稳定在8.7%~9.2%之间。双原则策略运用近压远、重压轻原则有序堆叠, 保证先出的集装箱始终在上层, 同时利用就近最矮堆栈原则选择最优栈, 减少多层堆叠带来的不必要翻箱, 此外, 该策略能适应较大集装箱规模的协同作业, 使结果数值更低且收敛更快、数值变化更稳定。然而, 全原则策略较双原则策略增加集装箱分类规则, 在分类区已将同类集装箱按照作业标记分类好, 同类型堆存区轨道吊直接抓取堆存即可, 不会出现双原则策略下可能夹杂非同类集装箱的现象, 从而减少翻箱时间。所以, 全原则策略下翻箱时间占比数值大部分都低于双原则策略结果,

同时, 全原则策略下翻箱时间占比最大数值差更小, 数值变化更加稳定。

综上所述, 全原则策略下数据结果表现最优。全原则策略能够随集装箱规模的增加, 翻箱时间占比数值变化在低数值区间保持稳定。所以, 根据全原则策略特点, 本文方法更加适应较大集装箱规模场景下有序的集装箱分类堆存、转移任务。

本文选用“LRR→相邻贝搜索→LSR”启发式算法^[15]作为对比算法, 进行性能对比实验。本文通过分类协同启发式算法(下文简称“本文算法”)、“LRR→相邻贝搜索→LSR”启发式算法(下文简称“对比算法”)分别对19组参数输入进行求解并进行对比。求解后的对比实验结果如表2所示。2种方法等待时长如图8所示。

表2 对比实验结果
Table 2 Comparative experimental results

实验规模/箱	本文算法		对比算法	
	总时长/ τ	等待时长占比/%	总时长/ τ	等待时长占比/%
8	17	5.88	18	11.11
12	23	4.34	25	12.00
16	33	3.03	42	11.90
20	42	2.38	51	15.68
24	54	3.70	60	16.66
28	62	1.61	69	11.59
32	72	2.77	85	12.94
36	84	3.57	96	8.33
40	91	3.29	111	3.60
44	101	3.96	122	3.27
48	114	3.50	136	5.88
52	122	3.27	147	6.12
56	133	3.00	159	8.17
60	143	3.49	168	5.95
64	155	3.87	186	6.98
68	161	3.10	201	6.46
72	168	3.57	215	6.97
76	179	3.35	230	6.95
80	185	3.24	248	6.85

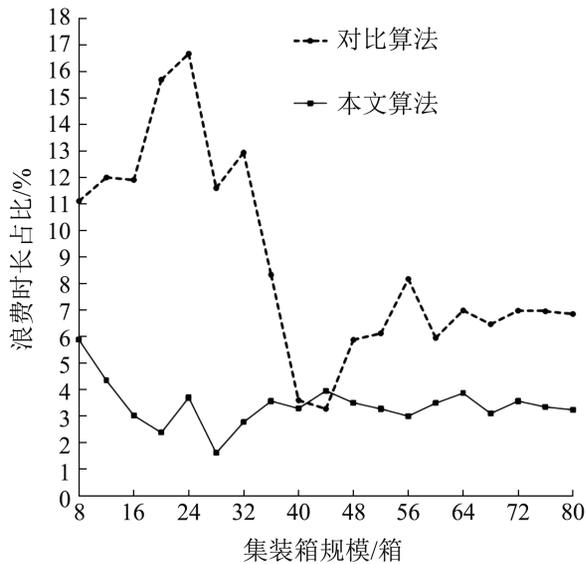


图8 等待时长占比对比图

Fig. 8 Waiting time percentage comparison chart

如表2所示,随着集装箱规模不断增加,2种算法所得任务总时长有所增加,但等待时长占比数值较低。由2种算法的调度总时长对比可知,本文算法所得总时长均小于对比算法,由此可得本文算法的调度完成更快;由2种算法的等待时长占比数值对比可知,除44箱集装箱情况下对比算法所得等待时长占比数值更小,其余情况下本文算法结果数值更优,本文算法的协同效果更佳。

根据图8可知,两类算法所得等待时长占比数值随着集装箱规模的增加均能在较低水平区间趋于稳定。集装箱规模在40箱以内时,随着集装箱规模不断增加,两类算法所得占比数值存在波动,其中对比算法数据结果峰值达到16.66%且最大数值差达到13.06%;本文算法所得数据结果峰值为5.88%且最大数值差为4.27%。对比算法在集装箱规模大于40后数据持续波动,最大数值差为4.9%,直到实验规模达到64时数值在6.5%~7%之间趋于稳定;本文算法在集装箱规模达到40之后,占比数值保持3%~4%之间稳定,最大数值差为0.87%。在全过程中本文算法数值峰值较对比算法小10.78%,谷值较对比算法小1.66%,平均值较对比算法小5.39%。

综上所述,本文算法能够合理优化本文分类协同调度问题。相较于对比算法计算结果,本文算法计算所得调度完成总时长和等待时长占比更低,且数值曲线收敛更快,数值变化在更低水平区间内保持稳定。

4 结论

本文结合实际作业过程中集装箱拥有多样的作业标记的情况,以堆场作业过程中因低效造成设备相互等待进而影响码头整体作业效率的问题,建立了分类协同调度模型。同时,基于集装箱分类规则、集装箱多重堆存原则,提出了调度过程中的惩罚机制,并利用该机制实现了堆存过程中自主箱位的选择操作,设计了分类协同启发式算法。随后,利用控制变量法进行对比实验,证明了分类协同算法所采用的策略先进性。最后,采用同类算法对比实验,数值实验结果表明分类协同启发式算法能够合理计算本文所提调度模型,且计算结果数值更低、数值变化更平稳,证明了分类协同启发式算法计算稳定性和高效性。

综上所述,本文算法能够根据集装箱作业标记进行集装箱分类堆存并实现转运,优化因多样的集装箱标记而造成堆场调度难度大的问题,同时在分类操作的同时优化了集装箱堆存操作,有效降低了调度过程中设备相互等待的时长。未来研究方向将注重U型码头动态分类协同调度,优化动态调度,以适应更靠近实际的问题背景。

参考文献:

- [1] 段宗贝. 基于大数据分析的自动化集装箱码头运营优化研究[D]. 厦门: 集美大学, 2017.
Duan Zongbei. Research on Optimization of Automatic Container Terminal Operation Based on Big Data Analysis[D]. Xiamen: Jimei University, 2017.
- [2] Li C L, Vairaktarakis G L. Loading and Unloading Operations in Container Terminals[J]. IIE Transactions, 2004, 36(4): 287-297.
- [3] Xing Yao, Yin Kai, Quadrioglio L, et al. Dispatch Problem of Automated Guided Vehicles for Serving Tandem Lift Quay Crane[J]. Transportation Research

- Record, 2012, 2273(1): 79-86.
- [4] Luo Jiabin, Wu Yue, André Bergsten Mendes. Modelling of Integrated Vehicle Scheduling and Container Storage Problems in Unloading Process at an Automated Container Terminal[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 94: 32-44.
- [5] 梁承姬, 刘永强. 带有缓存区的集装箱码头AGV和场桥的联合调度[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(24): 247-253.
Liang Chengji, Liu Yongqiang. Joint Dispatch of Container Terminal AGV and Yard Crane with Buffer Area[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(24): 247-253.
- [6] Liu Wenqian, Zhu Xiaoning, Wang Li, et al. Rolling Horizon Based Robust Optimization Method of Quayside Operations in Maritime Container Ports[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 256: 111505.
- [7] Lu Yiqin, Le Meilong. The Integrated Optimization of Container Terminal Scheduling with Uncertain Factors[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2014, 75: 209-216.
- [8] Xu Bowei, Liu Xiaoyan, Li Junjun, et al. Dynamic Appointment Rescheduling of Trucks Under Uncertainty of Arrival Time[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(5): 695.
- [9] 丁一, 李甜甜. 自动化集装箱码头U型工艺仿真研究[J]. *系统仿真学报*, 2021, 33(12): 2944-2951.
Ding Yi, Li Tiantian. Simulation Research on U-automated Container Terminal[J]. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(12): 2944-2951.
- [10] Xu Bowei, Jie Depei, Li Junjun, et al. Integrated Scheduling Optimization of U-shaped Automated Container Terminal Under Loading and Unloading Mode[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 162: 107695.
- [11] Xu Bowei, Jie Depei, Li Junjun, et al. A Hybrid Dynamic Method for Conflict-free Integrated Schedule Optimization in U-shaped Automated Container Terminals[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(9): 1187.
- [12] Liu Wenqian, Zhu Xiaoning, Wang Li, et al. Multiple Equipment Scheduling and AGV Trajectory Generation in U-shaped Sea-rail Intermodal Automated Container Terminal[J]. *Measurement*, 2023, 206: 112262.
- [13] Li Junjun, Yang Jingyu, Xu Bowei, et al. Hybrid Scheduling for Multi-equipment at U-shape Trafficked Automated Terminal Based on Chaos Particle Swarm Optimization[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(10): 1080.
- [14] 郭雷. U型布局自动化集装箱码头IGV调度优化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
Guo Lei. IGV Scheduling Optimization in Automated Container Terminal with U-shaped Layout[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [15] 李曼. U型自动化码头堆场堆存策略及箱位分配问题研究[D]. 上海: 上海海事大学, 2022.
Li Man. Research on Storage Strategy and Container Slot Allocation in U-shaped Automated Terminal Yard[D]. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2022.
- [16] 贺裕雁. 集装箱港口出口箱单贝箱位分配模型与算法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
He Yuyan. Research on the Optimization Model and Algorithm of Outbound Container Storage Location Assignment Problem of One Bay in Container Terminal[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [17] 郭丽彬. 集装箱码头堆场堆存与外集卡提箱联合优化研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
Guo Libin. Joint Optimization of Storage Yard Stacking and External Trucks Retrieving in Container Terminals[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020.